

Anežka JURČÍKOVÁ¹, Miroslav ROSMANIT²

NUMERICKÉ MODELOVÁNÍ SVAŘOVANÉHO T – STYČNÍKU

A NUMERICAL MODELING OF WELDED T - JOINT

Abstrakt

Předmětem této práce je vytvoření vhodného numerického modelu (MKP program Ansys) svařovaného trubkového T-styčnicku a porovnání získaných výsledků s hodnotami únosností vypočítaných podle Eurokódu. Získané poznatky budou dále využity pro řešení podobných styčnicků v softwarech dostupných pro běžnou inženýrskou praxi a také pro řešení složitějších styčnicků, jejichž řešení norma přesně neuvádí.

Klíčová slova

Příhradová konstrukce, T-styčnick, porucha, MKP, Shell

Abstract

The subject of this work is to create a suitable numerical model (FEM program Ansys) of welded tubular T-joint and compare obtained results with the load capacity values calculated according to Eurocode. The acquired knowledge will be further used for solving similar joints in the softwares available for common engineering practice and also for more complex joints which solutions are not mentioned exactly in design codes.

Keywords

Lattice structure, T-joints, failure, FEM, Shell

1 ÚVOD

V dnešní době se pro výstavbu halových objektů a pro překlenutí velkých rozponů s výhodou využívají příhradové vazníky i příhradové rámové konstrukce z dutých průřezů, především pro jejich estetický vzhled a příznivé statické působení (dvojose symetrický průřez, zkrácení vzpěrných délek, dosažení požadované únosnosti při zachování subtilnosti konstrukce) [1].

U ocelových příhradových konstrukcí je problematické především řešení jejich styčnicků. Návrhové postupy, které udává norma, jsou komplikované, obtížně kontrolovatelné a mají pouze omezené použití (geometrické podmínky, omezení materiálových charakteristik, pouze určité typy styčnicků s danými způsoby zatížení).

Problematickou navrhování styčnicků ocelových konstrukcí se zabývají mnohá evropská pracoviště, např. [2], [3], [4]. Moderní postupy řešení ocelových styčnicků využívají metodu komponent [5], [6].

¹ Ing. Anežka Jurčíková, Katedra konstrukcí, Fakulta stavební, VŠB-Technická univerzita Ostrava, Ludvíka Podéště 1875/17, 708 33 Ostrava - Poruba, tel.: (+420) 597 321 925, e-mail: anezka.jurcikova@vsb.cz.

² Ing. Miroslav Rosmanit, Ph.D., Katedra konstrukcí, Fakulta stavební, VŠB-Technická univerzita Ostrava, Ludvíka Podéště 1875/17, 708 33 Ostrava - Poruba, tel.: (+420) 597 321 398, e-mail: miroslav.rosmanit@vsb.cz.

2 ZÁKLADNÍ PRINCIPY POSUZOVÁNÍ STYČNÍKŮ DLE ČSN EN 1993-1-8 [7]

Aby mohl být svařovaný styčník posouzen normovým postupem, musí průřezy splnit následující podmínky:

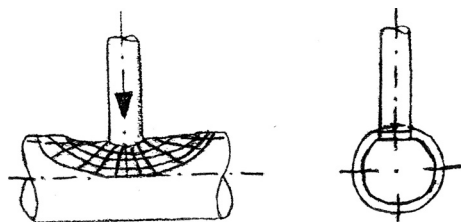
- jmenovitá mez kluzu nemá překročit 460 N/mm^2
- jmenovitá tloušťka stěny nemá mít menší než 2,5 mm a větší než 25 mm
- průřezy tlačných částí prutů mají být třídy 1 nebo 2
- další geometrické podmínky (viz tabulka 1)

Tab. 1: Rozsah platnosti pro svařované styčníky

0,2 ≤ d _i /d ₀ ≤ 1,0		
Třída 2	10 ≤ d ₀ /t ₀ ≤ 50	všeobecně
ale	10 ≤ d ₀ /t ₀ ≤ 40	pro styčníky tvaru X
Třída 2	10 ≤ d _i /t _i ≤ 50	
λ _{ov} ≥ 25%		
g ≥ t ₁ + t ₂	pro styčníky s mezerou	
Pozn.: použité symboly jsou vysvětleny na obr. 3		

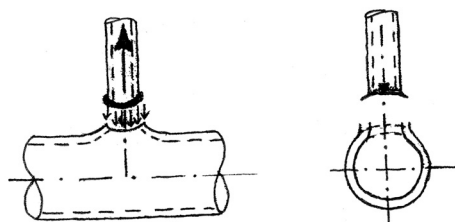
Při určování návrhové únosnosti styčníků dutých průřezů se mají uvažovat následující typy porušení:

- a) Porušení povrchu pásu (plastické porušení povrchu pásu) nebo plastifikace pásu (plastické porušení průřezu pásu);



Obr. 1: Schéma porušení povrchu pásu

- b) Porušení boční stěny pásu (nebo porušení stojiny pásu) zplastizováním, podrcením nebo ztrátou stability tvaru (borcením nebo vybočením boční stěny nebo stojiny pásu) pod tlačným mezipásovým prutem;
- c) Porušení pásu smykem;
- d) Prolomení smykem stěny dutého průřezu pásu (iniciace trhliny vedoucí k odtržení mezipásového prutu od dutého průřezu);

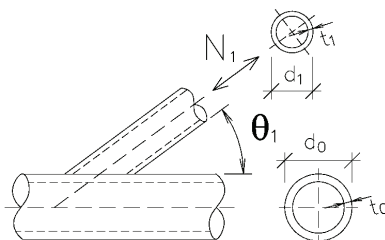


Obr. 2: Schéma prolomení stěny pásu smykem

- e) Porušení mezipásového prutu s redukovanou účinnou šířkou (trhliny ve svařech nebo mezipásových prutech);
- f) Porušení místním vybočením mezipásového prutu nebo dutého průřezu pásu ve styčnicku

Pro stanovení návrhové únosnosti styčnicků se vychází z únosnosti mezipásových prutů v tlaku, která je obecně nižší než v tahu. U svařovaných styčnicků se má při splnění podmínek v Tabulce 1 uvažovat pouze porušení povrchu pásu (a) a prolomení smykem (d), přičemž návrhová únosnost styčnicku je pak menší z obou hodnot osových únosností.

Návrhová osová únosnost svařovaných T a Y styčnicků může být za předpokladu splnění výše uvedených podmínek stanovena takto [7]:



Obr. 3: Geometrie a způsob zatížení Y a T - styčnicku

1) Porušení povrchu pásu

$$N_{1,Rd,1} = \frac{\frac{\gamma^{0,2} \cdot k_p \cdot f_{y0} \cdot t_0^2}{\sin \theta_1} \cdot (2,8 + 14,2 \cdot \beta^2)}{\gamma_{M5}} \quad (1)$$

kde:

$$\gamma \quad - \quad \text{poměr průměru pásu k dvojnásobku jeho tloušťky}; \quad \gamma = \frac{d_0}{2t_0} \quad (2)$$

$$\beta \quad - \quad \text{poměr průměru mezipásového prutu k průměru pásu}; \quad \beta = \frac{d_1}{d_0} \quad (3)$$

d_0 – vnější průměr prutu dolního pásu [mm]

f_{y0} – mez kluzu materiálu [MPa],

k_p – $k_p = 1,0$ pro $n_p \leq 0$, tzn. pásový prut je tažený

$$n_p \quad - \quad \text{poměr napětí v pásu v místě styčnicku k mezi kluzu}; \quad (\sigma_{p,Ed}/f_{y0}) / \gamma_{m5} \quad (4)$$

t_0 – tloušťka stěny dolního pásu [mm],

d_1 – vnější průměr připojeného prutu [mm]

θ_1 – úhel, který svírají připojené pruty [°]

γ_{M5} – součinitel bezpečnosti materiálu [1,0].

2) Porušení prolomením smykem

$$N_{1,Rd,2} = \frac{\frac{f_{y0}}{\sqrt{3}} \cdot t_0 \cdot \pi \cdot d_1 \cdot \frac{1 + \sin \theta_1}{2 \sin^2 \theta_1}}{\gamma_{M5}} \quad (5)$$

kde:

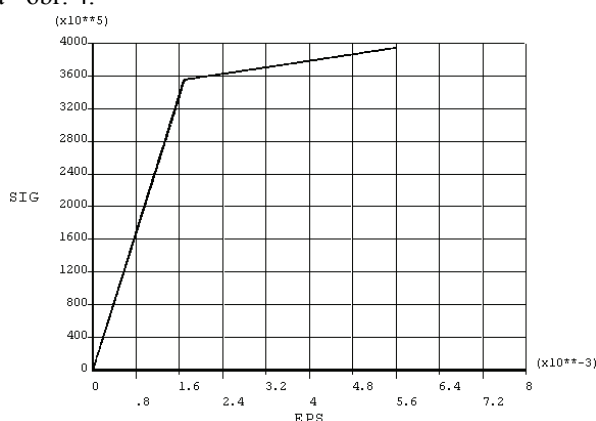
$$d_1 \leq d_0 - 2 \cdot t_0$$

3 NUMERICKÝ MODEL

Jako model byl pro jednoduchost zvolen trubkový svařovaný styčník typu T, jehož mezipásový prut je zatížen osově a spodní pás není zatížen žádnou silou ani deformací.

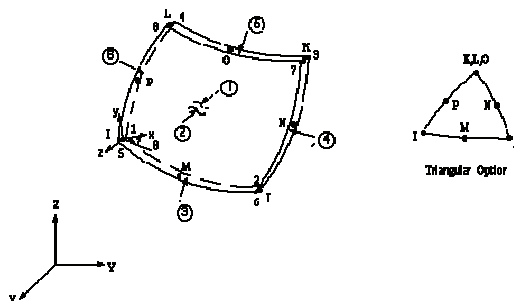
K modelování profilů trubek byl použit 8 – uzlový skořepinový konečný prvek SHELL 93 (viz obr. 5), který je vhodný pro modelování zakřivených ploch (podobně jako [2]). Výhodný je zejména proto, že umožňuje zahrnout do výpočtu plastické chování materiálu i vliv velkých deformací. Tento prvek má 6 stupňů volnosti v každém uzlu: posun ve směrech x , y , a z a pootočení kolem os x , y , a z . Charakterizován je osmi uzly, čtyřmi tloušťkami (v rozích konečného prvku) a ortotropními materiálovými vlastnostmi [8].

V řešeném modelu byla konečnému prvku zadána vždy konstantní tloušťka a následující izotropní materiálové vlastnosti: Youngův modul pružnosti $E = 210$ GPa a Poissonův součinitel $\nu = 0,3$. Při výpočtu byly uvažovány jak fyzikální, tak i geometrické nelinearity (plastický výpočet s uvažováním velkých deformací). Pružno-plastické vlastnosti materiálu jsou vyjádřeny bilineární křivkou (viz např. [3], [9]) s hodnotou modulu pružnosti po zpevnění $E_2 = 10$ GPa a s mezí kluzu materiálu $f_y = 355$ MPa - obr. 4.



Obr. 4: Použitý bilineární pracovní diagram

Vzhledem k tvaru jednotlivých ploch byla síť konečných prvků vytvořena programem automaticky (free mesh) při dodržení kvadratického tvaru konečného prvku. Pro velikost elementu byla zvolena hodnota 0.015, která se ukázala být pro daný model vhodná vzhledem k hustotě sítě a přesnosti výpočtu. Od modelování svaru v přípoji trubek bylo v tomto případě upuštěno.



Obr. 5: Konečný prvek SHELL 93 [8]

Pro model T – styčníku byla zvolena délka pásového prutu $l_0 = 1000$ mm a délka připojeného mezipásového prutu pak $l_1 = 500$ mm. Přesná geometrie jednotlivých modelů viz tabulka 2. Na obou koncích dolního pásu je zabráněno posunům ve směru osy x , y a z a mezipásový prut je pouze osově zatížen. Osově zatížení je na výplňový prut zaváděno předepsanou deformací volného konce mezipásového prutu (podobně jako [3]). Ve styčníku je vyvozováno pouze tahové napětí. Při napětí tlakovém byly v použitém modelu problémy s iterací v konečné fázi výpočtu.

Tab. 2: Parametry řešených styčníků

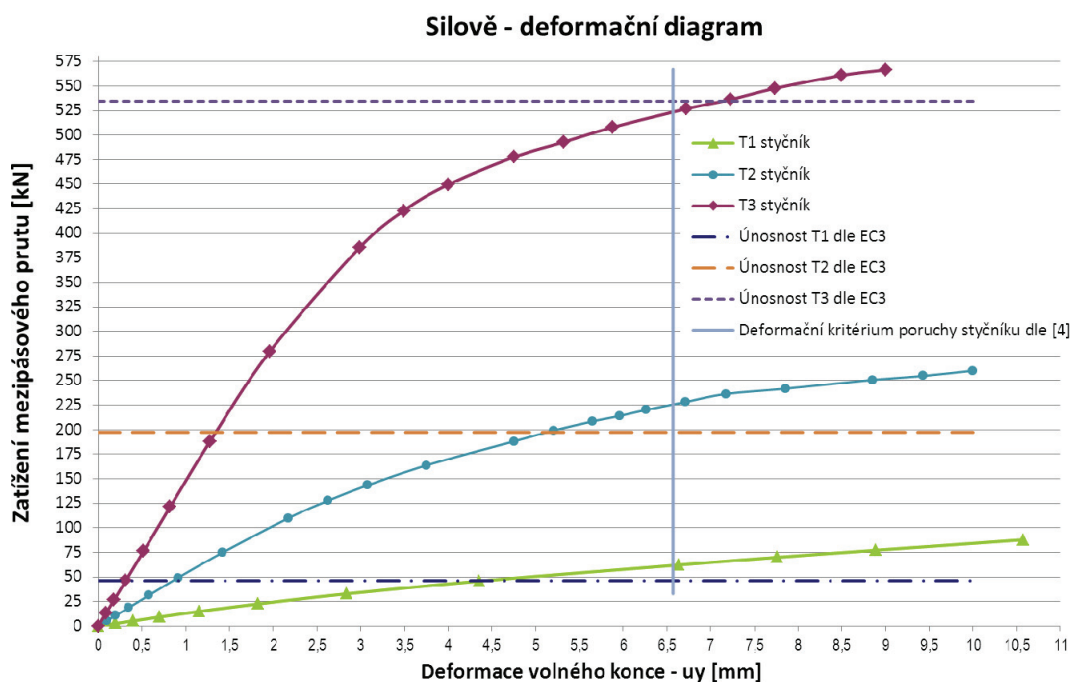
Ozn. modelu	d_0	t_0	d_1	t_1	β	$N_{1,Rd,t}$	$N_{1,Rd,1}$	$N_{1,Rd,2}$
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[-]	[kN]	[kN]	[kN]
T1	219	4,5	44,5	4	0,203	94,798	46,091	128,941
T2	219	8	89	5	0,406	241,176	197,277	458,456
T3	219	8	194	6,3	0,886	670,472	534,602	999,331
T4	250	25	50	5	0,200	132,438	1031,037	804,8735

kde: $N_{1,Rd,t}$ – tahová únosnost mezipásového prutu $N_{1,Rd,t} = A_I f_{yd}$ (6)
 $N_{1,Rd,1}$ – únosnost na porušení povrchu pásu
 $N_{1,Rd,2}$ – únosnost na prolomení smykem

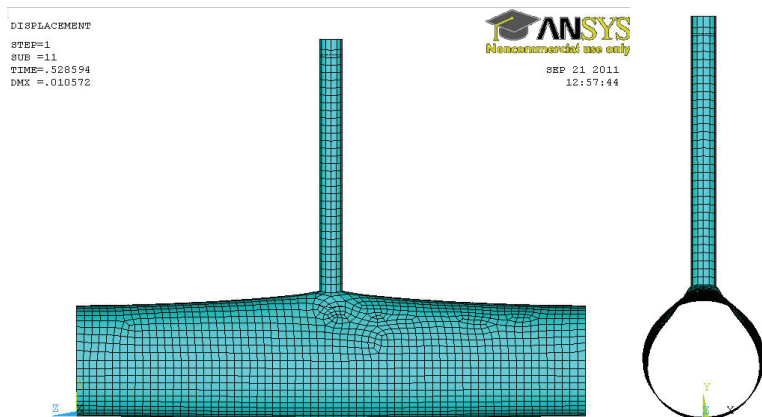
Nepodařilo se najít styčník, který by dle Eurokódu vyhovoval kritériu na prolomení pásu smykem. U těch styčníků, které toto kritérium splňovaly, byla únosnost styčníku větší, než únosnost výplňového prutu (viz např. T4) a nebyly proto ani dále řešeny.

4 VÝSLEDKY NUMERICKÉHO MODELOVÁNÍ

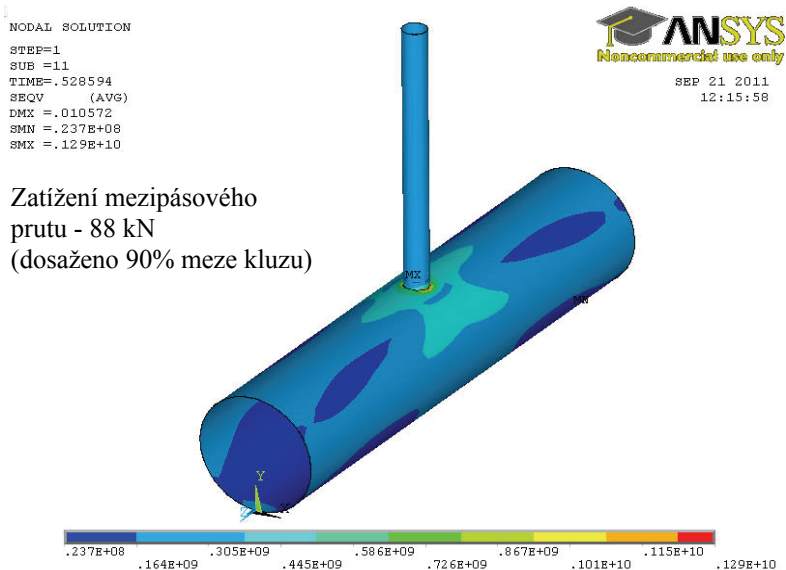
Výsledky jednotlivých modelů jsou prezentovány formou silově - deformačních diagramů (viz obr. 6) a dále pak grafickými výstupy z programu Ansys 12.0, konkrétně deformovaným tvarem a průběhem von Misesova napětí v jednotlivých modelech styčníků (obr. 7 až 12).



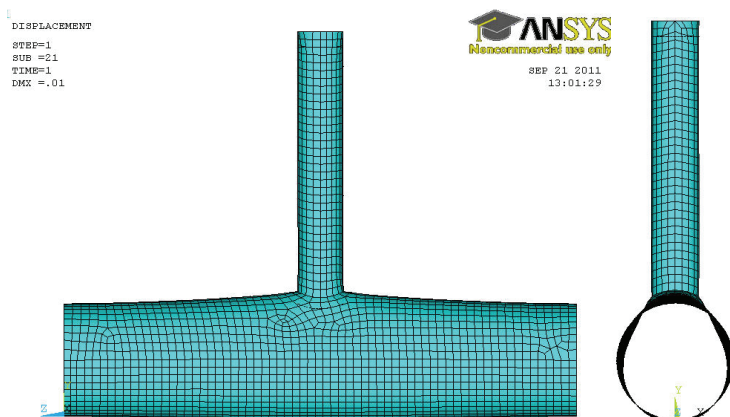
Obr. 6: Silově deformační diagramy jednotlivých modelů T - styčníků, srovnání s únosnostmi dle EC3 [7]



Obr. 7: Deformovaný styčník T1 (zvětšené měřítko)



Obr. 8: von Misesovo napětí [Pa] na styčníku T1 (Top Layer)



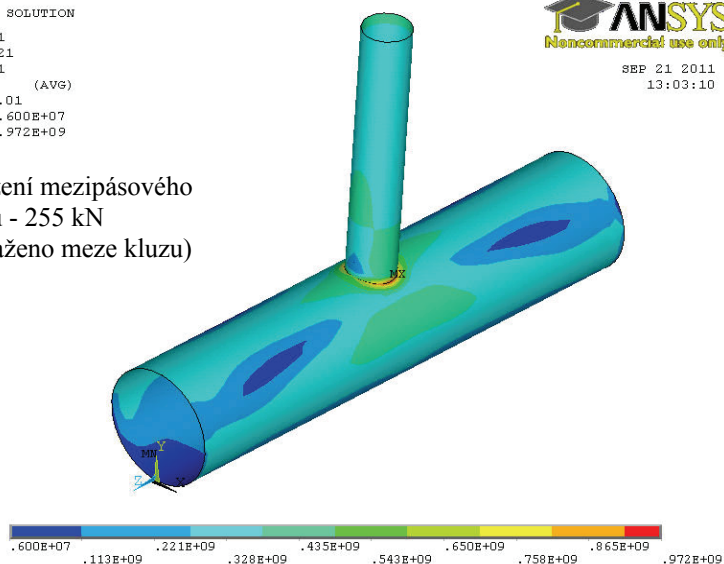
Obr. 9: Deformovaný styčník T2 (zvětšené měřítko)

NODAL SOLUTION
STEP=1
SUB =21
TIME=1
SEQV (AVG)
DMX =.01
SMN =.600E+07
SMX =.972E+09

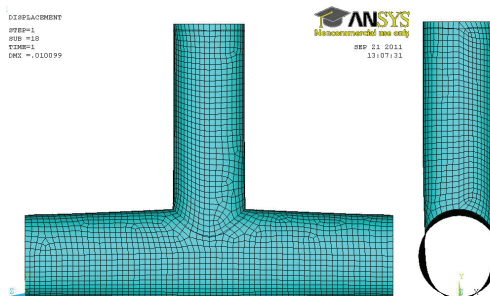


SEP 21 2011
13:03:10

Zatížení mezipásového
prutu - 255 kN
(dosaženo meze kluzu)



Obr. 10: von Misesovo napětí [Pa] na styčniku T2 (Top Layer)



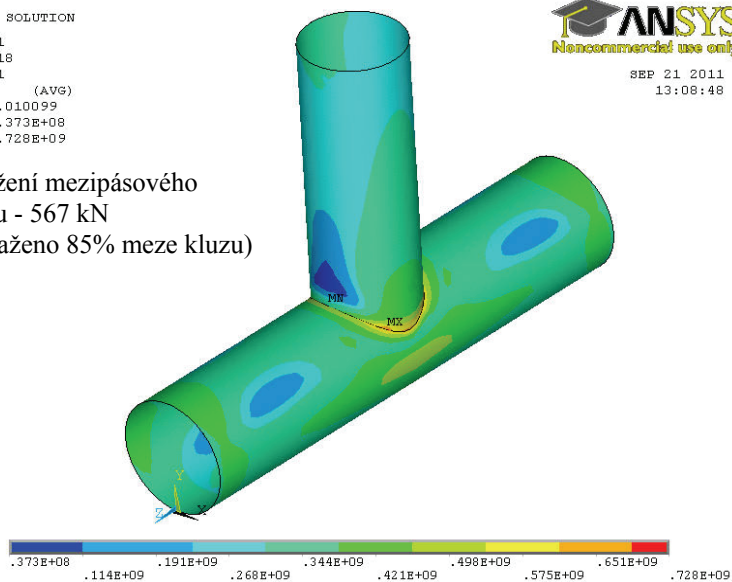
Obr. 11: Deformovaný styčník T3 (zvětšené měřítko)

NODAL SOLUTION
STEP=1
SUB =18
TIME=1
SEQV (AVG)
DMX =.010099
SMN =.373E+08
SMX =.728E+09



SEP 21 2011
13:08:48

Zatížení mezipásového
prutu - 567 kN
(dosaženo 85% meze kluzu)



Obr. 12: von Misesovo napětí [Pa] na styčniku T3 (Top Layer)

5 ZÁVĚR

Výsledný numerický model vystihuje chování styčnicku. V další fázi výzkumu je nutné zavedení kritérií pro stanovení únosnosti styčnicku (lokální a globální přetvoření, vliv zde neuvažovaných koncentrací napětí, apod.). V mnoha pracích zahraničních autorů toto kritérium není jasně dáno (viz např. [2]). Výsledky byly prozatím porovnávány pouze s návrhovými postupy dle evropských norem, mohlo by být zajímavé porovnání také s jinými existujícími metodami.

Poznatky získané při tvorbě těchto modelů budou využity pro další ověření chování tohoto a jiných typů styčnicků. Současný model je v mnoha ohledech zjednodušený, bylo by např. vhodné ověřit vliv svaru na chování modelu, vliv tloušťky stěny mezipásového prutu nebo vliv zatížení pásu tahem nebo tlakem na únosnost styčnicku, apod. Pokročilejší modely by se také měly zaměřit na omezení nežádoucích špiček napětí v místě spoje. V dalším výzkumu se předpokládá vytvoření komplexnějších numerických modelů složitějších a netypických styčnicků. Po podrobnějším seznámení s touto problematikou by bylo vhodné navrhnout případné změny či doporučení pro navrhování nebo modelování těchto typů styčnicků, např. také v MKP programech běžně dostupných v inženýrské praxi (např. SCIA Engineer, Ing. Software Dlubal).

PODĚKOVÁNÍ

Príspevek byl realizován za finanční podpory projektu specifického vysokoškolského výzkumu číslo SP2011/185 (Studentská grantová soutěž VŠB - TUO).

LITERATURA

- [1] Wardenier, J. *Hollow Sections in Structural Applications*. CIDECT, 2001. ISBN 0-471-49912-9
- [2] Salem, A. H., Soliman, E. A., Ibrahim, S. A. and Fakhry, K. F. Strength of hollow section T-joints under bending moments. In *Proceedings of Twelfth International Colloquium on Structural and Geotechnical Engineering*. Cairo - Egypt: Ain Shams University, 2007
- [3] de Lima, L. R. O., Vellasco, P. C. G. da S., da Silva, J. G. S., Neves, L. F. da C., Bittencourt, M. C. A numerical analysis of tubular joints under static loading. In *Proceedings of APCOM'07 in conjunction with EPMESC XI*, Kyoto, Japan. December 3-6, 2007.
- [4] Kvočák, V., Beke, P. Problematika konštrukčného riešenia uzlov uzavretých prierezov. *Konstrukce*. 1/2010, pp. II-V. ISSN 1213-8762.
- [5] Wald, F., Sokol, Z. *Navrhování styčnicků*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1999. 144 pp. ISBN 80-01-02073-8
- [6] Odrobiňák, J., Vičan, J. Zavádzanie metódy komponentov pre polotuhý prípoj oceľ - drevo. Sborník prednášok: *Vedecká konferencia s medzinárodnou účasťou "Drevostavby"*. Vydal: pre ŽU v Žiline - Miroslav Gibala, KNM, 2010. pp. 87-92. ISBN 978-80-970171-2-5
- [7] ČSN EN 1993-1-8, Eurokód 3: *Navrhování ocelových konstrukcí - Část 1-8: Navrhování styčnicků*. Český normalizační institut, 2006. 126s.
- [8] *Release 11.0 Documentation for ANSYS* [online]. [cit. 2011-9-15]. Dostupné z <<http://www.kxcad.net/ansys/ANSYS/ansyshelp>>
- [9] Lojik, O. *Vliv tuhosti styčnicku na chování prostorových prutových konstrukcí*. Praha, srpen 2007. 103s. Disertační práce k získání akademického titulu Ph.D. na Fakultě stavební České vysoké učení technické v Praze. Školitel Doc. Ing. Milan Vašek, CSc.

Oponentní posudek vypracoval:

Ing. Zdeněk Sokol, Ph.D., Katedra ocelových a dřevěných konstrukcí, FAST, ČVUT v Praze.

Prof. Ing. Stanislav Kmeť, Ph.D., Katedra kovových a dřevěných konstrukcí, SvF, TU v Košiciach.